



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 198 13 180 A 1**

⑤ Int. Cl.⁶:
H 01 S 3/19
H 01 L 21/20
H 01 L 21/3063
G 02 B 6/10

⑳ Aktenzeichen: 198 13 180.1
㉔ Anmeldetag: 25. 3. 98
㉕ Offenlegungstag: 7. 10. 99

DE 198 13 180 A 1

㉑ Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

㉒ Erfinder:
Lell, Alfred, 93142 Maxhütte-Haidhof, DE; Kugler,
Siegmar, Dr., 93055 Regensburg, DE; Stath,
Norbert, Dr., 93049 Regensburg, DE; Oberschmid,
Reimund, Dr., 93161 Sinzing, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

DE 1 96 40 422 A1
DE 1 96 40 420 A1
US 55 04 768
US 54 74 954
US 49 49 352
EP 04 50 255 A1

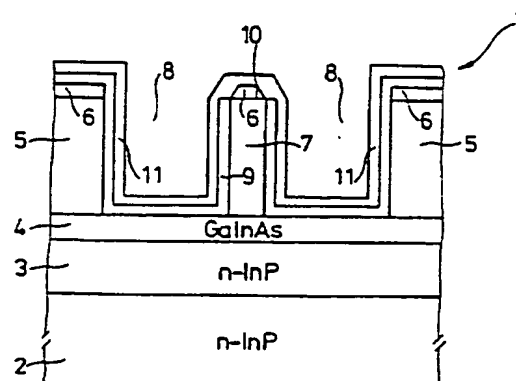
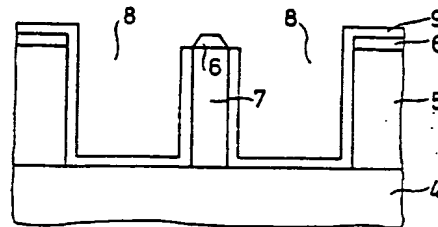
US-Z.: IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 24,
No.6, Nov. 1981, S. 2858-2859;
GB-Z.: Electronics Letters, Vol. 22, No. 20,
1986, S. 1081-1082;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur Herstellung eines Stegwellenleiters in III-V-Verbindungshalbleiter-Schichtstrukturen und Halbleiterlaservorrichtung besonders für niedere Serienwiderstände

⑤7 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung eines Stegwellenleiters in III-V-Verbindungshalbleiter-Schichtstrukturen, mit den Schritten: Fertigen einer auf einem Halbleiter-Substrat (2) insbesondere durch epitaktisches Aufwachsen ausgebildeten Grundstruktur mit einer ersten Mantelschicht (3), einer auf der ersten Mantelschicht (3) abgeschiedenen aktiven Zone (4) bestehend aus einheitlichem Material oder aus einer Wechselfolge von Quantentöpfen und Barrieren, einer auf der aktiven Zone (4) abgeschiedenen zweiten Mantelschicht (5) und einer auf der zweiten Mantelschicht (5) abgeschiedenen Kontaktschicht (6); ganzflächiges Abscheiden und Strukturieren einer Grabenmaske (13) zur Festlegung eines Grabenbereichs (14), der etwa die zwanzigfache Breite eines nachfolgend in der Mitte des Grabenbereichs (14) aus der zweiten Mantelschicht (5) und der Kontaktschicht (6) zu erzeugenden Steges (7) besitzt; Einbringen zusätzlicher Dotieratome in die Kontaktschicht (6) und/oder Aktivieren der zusätzlich eingebrachten oder der bereits vorhandenen Dotieratome; Ausbilden einer im wesentlichen streifenförmigen Stegmaske (15) innerhalb des Grabenbereichs (14); selektives Ätzen der zweiten Mantelschicht (5) und der Kontaktschicht (6) unter Verwendung der Grabenmaske (13) und der Stegmaske (15) als Abdeckmasken zur Ausbildung des Steges (7) des Stegwellenleiters innerhalb des Grabenbereichs (14); im wesentlichen kantenkonformes Abscheiden einer Passivierungsschicht (9) aus ...



DE 198 13 180 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung eines Stegwellenleiters in III-V-Verbindungshalbleiter-Schichtstrukturen und eine Halbleiterlaservorrichtung, insbesondere eine sogenannte Ridge-waveguide-Laservorrichtung auf der Basis von III-V-Halbleitermaterialien.

Halbleiterlaserdioden finden mittlerweile einen breiten Anwendungsbereich insbesondere auch in informationsverarbeitenden Systemen. Aufgrund ihrer kompakten Größe und zum Teil auch wegen der zu den verwendeten Schaltkreisen und weiteren optoelektronischen Elementen kompatiblen Technologie werden Halbleiterlaserdioden insbesondere in der optoelektronischen Nachrichtentechnik. Im Hinblick auf den Aufbau und die Anordnung solcher Laserdioden werden derzeit unterschiedliche Typen von Laserstrukturen verwendet. Eine besonders einfach herzustellende und zuverlässig arbeitende Laservorrichtung umfasst einen in einer III-V-Verbindungshalbleiter-Schichtstruktur ausgebildeten Stegwellenleiter; solche Laseranordnungen, die auch der erfindungsgemäßen Gattung zugrunde liegen, sind beispielsweise aus der EP O 450 255 A1 und aus C. Harder, P. Buchmann, H. Meier, High-Power Ridge-Waveguide AlGaAs Grin-Sch Laser Diode, Electronics Letters, 25. September 1986, Vol. 22, No. 20, Seiten 1081 bis 1082 bekannt geworden. Bei der Herstellung derartiger selbstjustierender Wellenleiter-Laserstrukturen wird normalerweise eine einzige photolithographische Maske zur Festlegung der vollständigen Kontaktbereich- bzw. Wellenleiterstegeometrie über den gesamten Herstellprozess zur Fertigung des Steges verwendet. Bei der Übertragung der zunächst bei der Fertigung von Laservorrichtungen auf der Grundlage des GaAs-Systems entwickelten Fertigungsprozesse auf die Herstellung von InP-Lasersystemen mit größeren Wellenlängen des emittierten Lichtes ergeben sich jedoch gewisse technologische Probleme. Als besonders kritisch wird hierbei insbesondere der bei der Fertigung des Stegwellenleiters erforderliche Ätzschritt angesehen, bei dem aufgrund der stets einhergehenden unerwünschten Unterätzung an der Grenzfläche des Photolack-GaInAs- oder GaInAsP-Kontaktes die wirksame ohmsche Kontaktfläche signifikant verringert wird, was zu einem Anstieg des elektrischen Kontaktwiderstandes und damit zu einer vermehrten Erwärmung führt. Als Folge hiervon verschlechtern sich allgemein die Lasereigenschaften. Zur Vermeidung dieser technologisch bedingten Schwierigkeiten wird nach der EP O 450 255 A1 vorgeschlagen, eine Hilfsmaske anzuordnen, um die mit der Unterätzung einhergehenden Nachteile zu vermeiden.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein gegenüber dem in der EP O 450 255 A1 aufgezeigten Fertigungsverfahren technologisch insgesamt einfacheres Verfahren zur Herstellung eines Stegwellenleiters in III-V-Verbindungshalbleiter-Schichtstrukturen zur Verfügung zu stellen.

Diese Aufgabe wird durch das Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Eine insbesondere nach diesem Verfahren herstellbare Halbleiterlaservorrichtung ist in Anspruch 17 angegeben.

Die gemäß § 3 Abs. 2 PatG Stand der Technik bildende deutsche Patentanmeldung Nr. 196 40 420.7 bezieht sich auf einen Ridge-Waveguide-Laser auf der Basis von InGaAsP/InP mit einer Dreibein-Struktur, bei der der im Wesentlichen streifenförmige Stegwellenleiter mittels eines nass-chemischen Ätzprozess-Schrittes innerhalb eines Grabenbereiches aus der InP-Mantelschicht und quaternärer Kontaktschicht ausgebildet wird. Der elektrische Anschluß des Steges erfolgt über eine Metallisierungsschicht, die ganzflächig auf einer Passivierungsschicht abgeschieden wird, wobei

die Passivierungsschicht aus elektrisch isolierendem Material die Dreibein-Struktur mit Ausnahme der Oberseite des Steges überdeckt.

Dieses Verfahren verzichtet ganz auf Trockenätzschritte, z. B. mittels Ionenätzverfahren, und kann mit weniger naßchemischen Ätzschritten als die bis dahin bekannten Verfahren durchgeführt werden. Erkauft wurde dies mit höheren Anforderungen an die Epitaxiestrukturen, besonders Feinheiten der Schichtübergangsformen, mit einer Unsicherheit der Stegbreite und mit einem höheren Serienwiderstand R_s der Halbleiterlaserstrukturen gegenüber den bisher bekannten Verfahren. Die Unsicherheit der Stegbreite hat sich als praktisch tragbar erwiesen (es gibt hier eine Unsicherheit der Fototechnikmaske in der Größenordnung von fast $\pm 0,6 \mu\text{m}$; die zusätzliche Ätzunsicherheit bei nur naßchemischen Ätzverfahren von etwa $\pm 0,4 \mu\text{m}$ scheint bisher verhältnismäßig tragbar). Kritischer hat sich aber der eindeutig höhere Serienwiderstand herausgestellt. Bei einer gegebenen beispielhaften $1,3 \mu\text{m}$ -Wellenlänge-InGaAsP-Halbleiterlaserstruktur mit $3 \mu\text{m}$ Stegbreite und $300 \mu\text{m}$ Resonatorlänge ist der Serienwiderstand normalerweise etwa $3 \text{ Ohm} \pm 0,5 \text{ Ohm}$. Die Anwendung des Verfahrens gemäß der deutschen Patentanmeldung Nr. 196 40 420.7 zeigte jedoch eine weit über das übliche hinausgehende Instabilität der Serienwiderstände. Es wurden Serienwiderstandswerte mit einer sehr breiten Verteilung zwischen etwa $3,5 \text{ Ohm}$ und bis zu 20 Ohm gemessen, die damit deutlich über der Toleranzgrenze lagen. Die damit verbundenen Ausbeuteverluste hätten sich – zusätzlich verbunden mit dem Zwang, sehr sorgfältig den Serienwiderstand noch im Chipzustand zu messen, – auf die Dauer als nicht akzeptabel erwiesen.

Als Ursache des hohen Serienwiderstandes stellte sich ein relativ hoher Kontaktwiderstand zwischen dem Anodenmetallkontakt und dem Halbleiter heraus. Um den Kontaktwiderstand zu verringern, werden bei dem erfindungsgemäßen Verfahren entweder zusätzliche Dotieratome in die Kontaktschicht durch Diffusion oder Implantation eingebracht und/oder es werden die bereits vorhandenen Dotieratome durch eine Temperung oder einen Laseblitz aktiviert.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich somit durch folgende Fertigungsschritte in der angegebenen Reihenfolge aus:

Fertigen einer auf einem Halbleiter-Substrat, insbesondere durch epitaktisches Aufwachsen, ausgebildeten Grundstruktur mit einer ersten Mantelschicht, einer auf der ersten Mantelschicht abgeschiedenen aktiven Zone bestehend aus einheitlichem Material oder aus einer Wechsel folge von Quantentöpfen und Barrieren, einer auf der aktiven Zone abgeschiedenen zweiten Mantelschicht und einer auf der zweiten Mantelschicht abgeschiedenen Kontaktschicht; ganzflächiges Abscheiden und Strukturieren einer Grabenmaske zur Festlegung eines Grabenbereiches, der eine vielfache Breite eines nachfolgend innerhalb des Grabenbereiches aus der zweiten Mantelschicht und der Kontaktschicht zu erzeugenden Steges besitzt; Einbringen zusätzlicher Dotieratome in die Kontaktschicht und/oder Aktivieren der bereits vorhandenen Dotieratome der Kontaktschicht; Ausbilden einer im Wesentlichen streifenförmigen Stegmaske innerhalb des Grabenbereiches; selektives Ätzen der Kontaktschicht und der zweiten Mantelschicht unter Verwendung der Grabenmaske und der Stegmaske als Abdeckmasken zur Ausbildung des Steges des Stegwellenleiters bei gleichzeitiger Ausbildung eines Grabens innerhalb des Grabenbereiches; im Wesentlichen kantenkonformes Abscheiden einer Passivierungsschicht aus elektrisch isolierendem Material; Abheben des auf der Stegmaske abgeschiedenen Materials der Passivierungsschicht durch Entfernen des unterliegenden Maskenmaterials der Stegmaske; und Abscheiden einer Me-

tallisierungsschicht für den elektrischen Anschluss des Steges.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgt das Dotieren der Kontaktschicht durch Eindiffundieren der Dotieratome.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgt das Ätzen der Kontaktschicht und der zweiten Mantelschicht in zwei voneinander getrennten Ätzschritten mit unterschiedlichen Ätzlösungen, wobei die Ätzung der jeweiligen Schicht selektiv gegenüber dem jeweils unterliegenden Material durchgeführt wird. Beim nass-chemischen Ätzen der Kontaktschicht wird das von der Stegmaske abgedeckte Material unterätzt. Des Weiteren wird zur nass-chemischen Ätzung der Kontaktschicht eine Schwefelsäure-Wasserstoffperoxid-Wasser-Ätzlösung und zur nass-chemischen Ätzung der zweiten Mantelschicht eine Phosphorsäure-Salzsäure-Ätzlösung verwendet. Bei der Ätzung der zweiten Mantelschicht erfolgt keine Unterätzung gegenüber der als Ätzmaske wirkenden, strukturierten Kontaktschicht. Sämtliche nass-chemische Ätzvorgänge kommen in vertikaler Richtung an der der zu ätzenden Schicht unmittelbar folgenden Grenzsicht auf Grund der materialspezifischen Selektivität der Ätzlösungen zu stehen. Die Flankenwinkel der Kontaktschicht werden eindeutig durch die kristallographisch bedingten Eigenschaften des Kontaktschichtmaterials vorgegeben bzw. bestimmt. Durch die Stegmaske wird in einem selbstjustierenden Prozess die Stegposition innerhalb des Grabens festgelegt, bezüglich der Breite des Steges aber lediglich der maximale Wert vorbestimmt.

In einem ersten nass-chemischen Ätzschritt an der Kontaktschicht wird über das Ausmaß der lateralen Unterätzung der Stegmaske die Breite des entstehenden Wellenleitersteiges festgelegt. Der stehengebliebene stegförmige Rest der Kontaktschicht wirkt wegen der Selektivität des Ätzangriffs zur zweiten Mantelschicht bei dem zweiten Ätzschritt als ideales Maskenmaterial: anschließend an die Kontaktschicht-/Mantelschichtgrenzfläche bildet sich im Material der zweiten Mantelschicht ein kristallographisch vorgegebener Flankenwinkel aus, der auch bei überlangen Ätzzeiten unverändert bleibt. Von Vorteil kann sich daher der aus der zweiten Mantelschicht herausgebildete Teil des Steges bündig an den stehengebliebenen Teil der Kontaktschicht anschließen.

Gegenüber dem bisherigen Verfahren zur Herstellung einer sogenannten Ridge-Waveguide-Laservorrichtung mit einem Wellenleitersteg auf der Basis der Materialien InGaAsP/InP besitzt die erfindungsgemäße Lösung einer auf rein nass-chemisch erzeugten Dreibein-Anordnung der Laservorrichtung unter anderem folgende Vorteile:

- Die nach dem Stand der Technik an sich als unerwünscht bezeichnete Unterätzung bei der Fertigung des Wellenleitersteiges wird erfindungsgemäße gezielt im Sinne einer einfacheren Fertigung im Wege des nass-chemischen Ätzens ausgenutzt; das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht somit eine Strukturierung der technologisch besonders kritischen Strukturen allein durch nass-chemische Ätzschritte. Auf diese Weise gelingt es, in einem relativ einfach durchzuführenden Arbeitsschritt, den etwa 2 bis 3 µm breiten und etwa 1,5 bis 2 µm hohen Wellenleitersteg geometrisch möglichst regelmäßig zu fertigen, um auf diese Weise letztlich zu einer möglichst glatten Linearität der Laserkennlinie (abgestrahlte Leistung (in mW) - eingespeister Laserstrom (in mA)) als Kennzeichen der gewünschten optoelektronischen Eigenschaften des Lasers zu gelangen. Sonach gelingt es, Nichtlinearitäten,

sogenannte "Kinks" (Knicke) in der Laserkennlinie, die unter anderem auch von geometrischen Unregelmäßigkeiten des Wellenleitersteiges stammen können, auf technologisch saubere Weise bei der Fertigung des Lasers zu vermeiden.

- Im Gegensatz zu den bisher bekannten Herstellungsverfahren ist bei der erfindungsgemäßen Lösung eine Oxidüberformung (Passivierungsschicht) erforderlich, die in einem einzigen Arbeitsschritt ausgebildet wird.
- Mit der erfindungsgemäßen Lösung gelingt es ferner, eine technologisch saubere Überdeckung des Wellenleitersteiges mit einer Metallisierungsschicht für den späteren Stromanschluss zu gewährleisten. Hierbei wird zur elektrischen Isolation gegenüber den nicht anzuschließenden Schichten die Passivierungsschicht kantenkonform und voll flächig abgeschieden, wobei dafür Sorge getragen ist, daß für den nachfolgenden Abhebeschritt definierte Abhebekanten an den gewünschten Stellen zur Verfügung stehen, damit das zur Abhebung eingesetzte Lösungsmittel in die übrigbleibende Photolackschicht eindringen kann. Das erfindungsgemäße Verfahren benötigt nur noch einen einzigen Abhebeschritt, der zudem ohne mechanische Unterstützung erfolgreich durchgeführt werden kann.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, daß zur nass-chemischen Ätzung der Kontaktschicht eine Schwefelsäure-Wasserstoffperoxid-Wasser-Ätzlösung verwendet wird. In besonders vorteilhafter Weise liegt hierbei die in der Ätzlösung verwendete Schwefelsäure in nicht konzentrierter Form vor. Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Ätzlösungen für diesen Einsatzbereich wird anstelle einer konzentrierten Schwefelsäure wie bislang eine mit Wasser verdünnte Schwefelsäure verwendet, wobei das Schwefelsäure-Wasser-Verhältnis voreingestellt ist, und darüber hinaus eine nur geringe Konzentration des Oxidationsmittels Wasserstoffperoxid vorgesehen ist. Aufgrund der vorgeschlagenen Zusammensetzung der Ätzlösung werden zum Einen die im Hinblick auf die entstehende Hydratationswärme und damit zusammenhängend eintretenden thermischen Zersetzungen insbesondere des Wasserstoffperoxidanteils einhergehenden Nachteile vermieden, und zum Anderen bleiben die günstigen chemischen und physikalischen Eigenschaften einer Ätzlösung mit hohem Schwefelsäuregehalt erhalten. Erfindungsgemäß wird die Ätzaktivität der Ätzlösung an arsenhaltigen Schichten durch den variablen Wasserstoffperoxidanteil bestimmt.

Hierdurch bedingt ergeben sich für nass-chemische Ätzlösungen im angegebenen Anwendungsbereich völlig neuartige Eigenschaften:

- Die Maskenunterätzung kann unabhängig von Unterschieden in der Maskenhaftung erfolgen und ist daher auch für lokal gestörte Oberflächen erfolgreich durchzuführen. Der Einsatz spezieller Prozess-Schritte oder Maskentechnologien zur Verbesserung der Adhäsion des Maskenmaterials kann entfallen.
- Unter der Voraussetzung chemischer Homogenität des Schichtmaterials läßt sich eine kontrollierte, lateral extrem gleichmäßige Ätzwirkung erzielen, die nicht einmal durch mechanisch-physikalische Einflüsse wie etwa Kratzer oder dergleichen zu stören ist (die vertikale Gleichmäßigkeit der Ätzung ist durch die vorhandene Selektivität gegenüber chemisch heterogenen Schichtsystemen vieler III-V-Halbleiterbauelemente ohnehin gegeben)
- Eine Unterätzung als meist unvermeidbare Begleit-

erscheinung herkömmlicher nass-chemischer Ätzverfahren wird nach der Erfindung zu einem gezielt nutzbaren Effekt. So können beispielsweise komplizierte Verfahrenstechniken für Abhebeprozesse überflüssig gemacht werden.

– Bedingt durch die Eliminierung des Einflusses nicht oder nur äußerst schwer kontrollierbarer Parameter auf das Ausmaß der Unterätzung kann dieser im allgemeinen unerwünschte Begleiteffekt bei der nass-chemischen Ätzung gezielt genutzt werden.

– Außerdem ermöglicht die gezielt eingesetzte Unterätzung eine optimale Vereinbarkeit bei der Kombination der Prozessanforderungen hinsichtlich einer möglichst kantenüberdeckenden Passivierung in Verbindung mit einer einfach, aber zuverlässig durchzuführenden Abhebetechnik.

Die genannten vorteilhaften Merkmale der Ätzwirkung bei der Ätzung der Kontaktschicht hängen unmittelbar mit einigen der folgenden Grundeigenschaften des erfindungsgemäß bevorzugten Ätzlösungssystems zusammen:

– Es liegt eine hohe Selektivität zwischen arsenhaltigen und nicht arsenhaltigen Schichten vor, das Ätzratenverhältnis beträgt demzufolge typischerweise mehr als etwa 500 : 1.

– Der geringe Wasserstoffperoxid-Volumenanteil in der Schwefelsäure-Mischung bedingt eine sehr hohe Selektivität zwischen herkömmlichen Positiv-Lacksystemen und ätzbarem Halbleitermaterial, wobei die Zersetzung der Photolacke aufgrund des Ätzangriffs so gering ist, daß sie nur bei Ätzzeiten im Bereich von Stunden überhaupt nachweisbar wird.

– Der Wirkungsmechanismus an arsenhaltigen Schichten wird über den Wasserstoffperoxidgehalt der Lösung eindeutig bestimmt.

Die Reaktionsrate und damit zusammenhängende Eigenschaften der Ätzlösung wie beispielsweise Richtungsunabhängigkeit der Ätzrate (isotropes Ätzverhalten) können somit gezielt auf die vorliegende Anwendung abgestimmt werden.

– Die Ätzlösung kann wegen des verhältnismäßig hohen Schwefelsäuregehaltes als spezifische Reinigungslösung benutzt werden, in dem der Wasserstoffperoxidgehalt – abhängig vom zu ätzenden arsenhaltigen Schichtmaterial – auf sehr niedrige Werte gesenkt wird (beispielsweise Volumenkonzentrationen im 0,1%-Bereich). Die Reaktionsraten sinken dabei auf nicht mehr feststellbare Werte. Im Übrigen kann die gleiche Lösung durch eine nachträgliche Wasserstoffperoxidzugabe anschließend wieder zum Ätzen benutzt werden.

– Da der Lösungsansatz ein voreingestelltes Schwefelsäure/Wasser-Verhältnis verwendet, gibt es bei Zusatz des geringen Wasserstoffperoxidanteils keine merkliche Erwärmung.

Aus der fehlenden Eigenerwärmung leiten sich unmittelbar weitere wichtige Eigenschaften der erfindungsgemäß bevorzugten Ätzlösung ab:

– Die Lösung ist sofort nach Zugabe des Wasserstoffperoxids und Durchmischung verwendbar.

– Es findet keine nachweisbare Zersetzung des durch Temperaturerhöhung besonders zersetzungsgefährdeten Wasserstoffperoxidanteils statt, da diese Substanz unter gewöhnlichen Lagerbedingungen bei Raumtem-

peratur stabil bleibt. Eine von selbst erzeugte störende Blasenbildung im Reaktionsmedium wird dadurch verhindert.

– Es ist durch gezielte Wasserstoffperoxid-Zugabe eine definierte Wasserstoffperoxid-Konzentrationseinstellung möglich.

Eine Abhängigkeit vom Herstellungs- bzw. Mischungsverfahren (beispielsweise durch Größe des Mengenansatzes oder Kühlungsbedingungen während der Mischung der Komponenten) kann nicht bestehen. Weiterhin sind Konzentrationsfehler durch Volumenausdehnungs- und Zersetzungseffekte ausgeschlossen.

– Die im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens bevorzugte Ätzlösung ermöglicht eine einfache Handhabbarkeit, da die Ätzlösung lediglich zweikomponentig und gefahrlos, d. h. – ohne Erwärmung angesetzt werden kann.

– Lange Standzeiten der Lösung in der Größenordnung bis zu 48 Stunden sind durch den Einsatz stabiler bzw. stabil gehaltener Lösungskomponenten möglich. Frische Lösungsansätze oder definierte Standzeiten sind somit keine Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit des Ätzergebnisses.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. der erfindungsgemäßen Halbleiterlaservorrichtung ergeben sich aus den weiteren Unteransprüchen.

Weitere Merkmale, Vorteile und Zweckmäßigkeiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der Zeichnung. Es zeigen:

Fig. 1 bis 8 in schematischen Schnitansichten die Reihenfolge der Prozess-Schritte eines Verfahrens zur Herstellung eines Stegwellenleiters in III-V-Verbindungshalbleiterschichtstrukturen gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Bevor die einzelnen Verfahrensschritte zur Fertigung einer erfindungsgemäßen Halbleiterlaservorrichtung gemäß Ausführungsbeispiel anhand der Fig. 1 bis 7 näher erläutert wird, wird zunächst anhand der schematischen Darstellung nach Fig. 8 die fertiggestellte Halbleiterlaservorrichtung erläutert. Das Ausführungsbeispiel nach Fig. 8 umfaßt eine Metal-Clad-Ridge-Waveguide- (MCRW-) Laservorrichtung 1 mit einer auf einem Halbleiter-Substrat 2 aus n-dotiertem InP insbesondere durch epitaktisches Aufwachsen ausgebildeten Grundstruktur mit einer gleichfalls aus n-dotiertem InP bestehenden ersten Mantelschicht 3, einer auf der ersten Mantelschicht 3 abgeschiedenen aktiven Zone 4, einer auf der aktiven Zone 4 abgeschiedenen zweiten Mantelschicht 5 aus p-dotiertem InP, und einer auf der zweiten Mantelschicht 5 abgeschiedenen Kontaktschicht 6 aus p-dotiertem GaInAs. Die für die Rekombination und Lichterzeugung dienende aktive Zone 4 kann entweder aus einheitlichem Material oder aus einer Wechsel folge von Quantentöpfen und Barrieren bestehen; im dargestellten Ausführungsbeispiel ist die aktive Zone 4 durch eine GaInAs-Doppel-Heterostruktur gebildet. Die aktive Zone 4 ist in an sich bekannter Weise von den ersten und zweiten Mantelschichten 3 und 5 umgeben, welche einen größeren Bandabstand als das Material der aktiven Zone besitzen, und zusammen mit einem streifenförmigen Steg 7 einen Wellenleiter bilden und die notwendige Ladungsträgereingrenzung bewirken. Der Steg 7 des Stegwellenleiters ist hierbei innerhalb eines in der zweiten Mantelschicht 5 und der Kontaktschicht 6 gefertigten Grabens 8 gebildet, wobei die Breite des Grabens 8 etwa das zwanzigfache der Breite des Steges 7 besitzt. Der Steg 7 weist beispielsweise eine Breite von etwa 2 bis 3 um und

eine Höhe von etwa 1,5 bis 3 μm auf; die schematische Darstellung nach Fig. 8 ist somit nicht streng maßstabsgetreu. Die Bezugsziffer 9 bezeichnet eine Passivierungsschicht aus vorzugsweise Al_2O_3 , welche mit Ausnahme der auf der Oberseite 10 des Steges 7 sämtliche Bestandteile der Laservorrichtung 1 kantenkonform überdeckt. Darauf abgeschieden befindet sich eine Metallisierungsschicht 11 für den elektrischen Anschluss des Steges 7 an Kontaktanschlüsse und äussere Kontaktauführungen, vermittelt derer der zum Betrieb des Lasers 1 notwendige Laserstrom zugeführt wird, welche jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Figuren nicht näher dargestellt sind. Da die Kontaktschicht 6 in einem oberflächennahen Bereich, vorzugsweise durch einen Diffusionsschritt, zusätzlich dotiert ist und/oder die vorhandenen Dotieratome durch eine Temperung oder einen Laserblitz zusätzlich elektrisch aktiviert werden, ist der Kontaktwiderstand Halbleiter-Metall verringert.

Nachfolgend werden anhand der Fig. 1 bis 7 in dieser Reihenfolge die aufeinanderfolgenden Prozess-Schritte zur Fertigung der erfindungsgemäßen Laservorrichtung näher erläutert, wobei in diesen Figuren aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit das Halbleiter-Substrat 2 und die erste Mantelschicht 3 nicht mehr dargestellt sind.

Auf die anhand Fig. 8 näher erläuterte Grundstruktur mit den Schichten 3 bis 6 wird zunächst ganz flächig eine Hilfsmaskenschicht 12 aus InP vorzugsweise epitaktisch abgeschieden, was zweckmäßigerweise in einem Arbeitsgang während des Epitaxiewachstums der gesamten Grundstruktur erfolgt. Die Schicht 12 besteht aus gegenüber der Kontaktschicht 6 selektiv ätzbarem Material und besitzt eine Stärke von etwa 0,2 μm . Die Hilfsmaskenschicht 12 begünstigt bzw. vereinfacht die nachfolgende Fertigung des Steges 7 im Sinne einer Verringerung der Anzahl von Prozess-Schritten, und unterstützt im Übrigen die Definition einer sauberen Abhebekante beim abschließenden Abhebeschritt, kann jedoch auch weggelassen werden, ohne vom erfindungsgemäßen Prinzip abzuweichen. Auf die ganzflächig abgeschiedene Hilfsmaskenschicht 12 wird Photolackmaterial aufgetragen, auf herkömmliche Weise photolithographisch belichtet und zur Ausbildung einer Grabenmaske 13 strukturiert, die für die folgenden Ätzschritte den Oberflächenbereich definiert, in welchem der in der umgebenden Grundstruktur versenkte Stegwellenleiter entstehen soll. In einer nachfolgenden nasschemischen Ätzung wird zunächst die Hilfsmaskenschicht 12 an den von der Grabenmaske 13 nicht abgedeckten Stellen entfernt. Die Strukturierung der Hilfsmaske 12 ist in Fig. 1 schematisch dargestellt.

Dann wird an der Kontaktschicht mindestens im Bereich des später strukturierten Steges eines Zn-Kontaktdiffusion mittels Aufschleudern einer Zn-haltigen Al_2O_3 -Aufschläm-mung und anschließendem Diffusionstempern (z. B. 10 Sekunden bei 650°C) vorgenommen. Zur besseren elektrischen Aktivierung des Dotierstoffes kann noch ein zusätzlicher Tempereschritt, beispielsweise für 10 Minuten bei 400°C in H_2 -, N_2 -, Ar-Gas oder einer Mischung hiervon angefügt werden. Die Aktivierung der Kontaktschicht kann auch in Form eines kurzen (< 100 ns) UV-Strahlungspulses einer Laserquelle (entweder zusätzlich oder ersatzweise zu den obigen Aktivierungsschritten) erfolgen. Anstelle des zusätzlichen Einbringens von Dotieratomen in die Kontaktschicht kann auch versucht werden, bereits während der Epitaxie für eine genügend hohe Dotierstoffkonzentration zu sorgen und diese dann später, wie oben beschrieben, zu aktivieren.

Daran anschließend kann gemäß Fig. 2 unter Verwendung der Grabenmaske 12, 13 die Kontaktschicht 6 zur Dickenkorrektur nass-chemisch wenigstens angeätzt werden, wobei dieser Ätzschritt im Prinzip auch weggelassen wer-

den kann.

Nachfolgend wird die bei den weiteren Schritten nicht mehr benötigte Fotolackmaske 13 entfernt, wobei die strukturierte Schicht 12 im Folgenden die Funktion der Grabenmaske übernimmt.

Daran anschließend wird mittels herkömmlicher Phototechnik innerhalb des Grabenbereichs 14, vorzugsweise mittig eine streifenförmige Stegmaske 15 aus Photolack ausgebildet, welche die Lage des zu ätzenden Wellenleitersteges definiert (Fig. 3).

Im nachfolgenden Prozess-Schritt wird gemäß Fig. 4 unter Verwendung der Stegmaske 15 und der Hilfsmaskenschicht 12 als Abdeckmasken die Kontaktschicht 6 selektiv durch einen nasschemischen Prozess mit exakt definierter Stegmaskenunterätzung dahingehend geätzt, daß das Ausmaß der Unterätzung an den mit der Bezugsziffer 16 bezeichneten Stellen weder von der Haftung der Photolackmaske 15 noch von lokalen Störungen der Kontaktschicht 6, noch von mikroskopischen Ungleichmäßigkeiten der Photolackflanken 17 beeinflusst wird. Dieser Ätzprozess definiert die oberen seitlichen Abmessungen sowie die Homogenität der Breite des entstehenden Steges und bewirkt in Folge der Maskierungswirkung der Hilfsmaskenschicht 12 im Außenbereich des Grabens eine Einbettung des Steges durch das unveränderte Epitaxie-Schichtensystem angrenzend an die in der ersten Phototechnik definierten Grabenabschnitte seitlich des Steges.

Zur nass-chemischen Ätzung der Kontaktschicht 6 wird vorzugsweise eine Schwefelsäure Wasserstoffperoxid-Wasser-Ätzlösung verwendet, wobei die Ätzung selektiv gegenüber dem Material der zweiten Mantelschicht 5 erfolgt, d. h. der Ätzvorgang kommt in vertikaler Richtung an der zu ätzenden Schicht 6 unmittelbar folgenden Grenzfläche der zweiten Mantelschicht 5 aufgrund der materialspezifischen Selektivität der Ätzlösung zum Stehen (Ätzstopwirkung der zweiten Mantelschicht 5 gegenüber der gewählten Ätzlösung). Gleichzeitig besteht ausreichende chemische Selektivität der gewählten Ätzlösung gegenüber der Grabenmaske 12, so daß das Material der Hilfsmaskenschicht 12 bei der Ätzung der Kontaktschicht 6 innerhalb der Nachweisgrenze nicht angegriffen wird. Vorteilhafterweise sind die Seitenwände der streifenförmigen Photolack-Stegmaske 15, und im Übrigen auch die Seitenwände der geätzten Grabenmaske 12 parallel zu den kristallographischen Richtungen [011] oder [011] orientiert. Mit diesem Ätzschritt gelingt eine gleichmäßig laterale Unterätzung der Photolack-Stegmaske 15, wobei die Flankenwinkel der geätzten Kontaktschicht 6 an den mit der Bezugsziffer 15 angedeuteten Stellen eindeutig durch die kristallographisch bedingten Eigenschaften des Kontaktschichtmaterials vorgegeben bzw. bestimmt werden. Der Grad der Unterätzung der Kontaktschicht 6 an den Stellen 16 bestimmt gleichzeitig in eindeutiger Weise die Breite des nachfolgend vervollständigten Wellenleitersteges 7. Die erfindungsgemäße von Vorteil ausgenutzte Unterätzung der Kontaktschicht 6 kann dabei so gewählt werden, daß es beim nachfolgenden Abscheiden der Passivierungsschicht 9 nicht zu einer unerwünschten Verkleinerung der ohmschen Kontaktfläche auf der Oberseite 10 des Steges kommt. Im Zuge der mehr oder weniger ausgeprägten Flankenbildung an den Stellen 16 wird effektiv die Grenzfläche zwischen der später aufgetragenen Metallisierung 11 und der Kontaktschicht 6 an der Oberseite 10 vergrößert, so daß der Kontaktwiderstand letztlich sogar geringer eingestellt werden kann.

Daran anschließend erfolgt gemäß Fig. 5 eine selektive nasschemische Ätzung der zweiten Mantelschicht 5 zur Ausformung des Stegwellenleiters mit in weiten Grenzen veränderbarer Flankenform. Hierbei wird die reproduzierbar

erzielbare Stegform außer durch die festgelegte Kristallrichtung und die vorgehende Kontaktschichtätzung insbesondere durch die Ätzlösung, die Ätzzeit und die Ätztemperatur, im Hinblick auf die Tiefe des Steges unter Umständen auch durch den konkreten Aufbau der Epitaxie-Schichtenfolge bestimmt. Aufgrund einer geeignet aufeinander abgestimmten Ätzlösung und Materialzusammensetzung wird bei diesem Prozess-Schritt gleichzeitig die restliche Hilfsmaskenschicht 12 im Außenbereich des Grabens entfernt. Wegen der chemischen Selektivität dieses Ätzprozesses übernimmt nach vollständiger Auflösung der Hilfsmaskenschicht 12 die noch verbleibende Kontaktschicht 6 die weitere Maskierungsfunktion. Zur nass-chemischen Ätzung der zweiten Mantelschicht 5 wird in bevorzugter Weise eine Phosphor-Salzsäure-Lösung verwendet, wobei aufgrund der chemischen Selektivität das Material der Kontaktschicht 6 und die unterhalb der zweiten Mantelschicht 5 angeordnete Schicht 4 von dieser Ätzlösung nicht angegriffen wird. Die Schicht 4 dient somit bei diesem Ätzschritt wiederum als Ätzstop. Bei der nass-chemischen Ätzung der zweiten Mantelschicht 5 findet keine Überätzung gegenüber der als Maske wirkenden Kontaktschicht 6 statt, so daß die im vorhergehenden Ätzschritt eingestellte Unterätzung der Kontaktschicht 6 an den Stellen 16 eindeutig die Stegbreite des Wellenleitersteges 7 bestimmt.

Daran anschließend wird gemäß Fig. 6 eine Passivierungsschicht aus Al_2O_3 ganz flächig und kantenkonform auf die sich ergebende Gesamtstruktur vermittels einem ionenstrahlgestützten Sputter-Prozess aufgebracht, wobei an den mit der Bezugsziffer 16 bezeichneten Stellen technologisch sauber definier et Lücken in der Passivierungsschicht 9 verbleiben, durch die im nachfolgenden Abhebeschritt das im Abhebeprozess zum Einsatz gelangende Lösungsmittel ohne Weiteres eindringen kann.

Fig. 7 zeigt den entsprechenden Zustand nach dem Abheben des auf der Photolackoberfläche gesputterten Al_2O_3 -Materials durch Auflösen des Photolacks der Stegmaske 15 in einem geeigneten Lösungsmittel unter Ausnutzung der gezielten Unterätzung des Photolacks während der vorhergehenden Kontaktschichtätzung.

In einem abschließenden Metallisierungsschritt wird gemäß Fig. 8 eine Metallisierungsschicht 11 für den elektrischen Anschluss des Steges 7 aufgebracht.

Bezugszeichenliste

- 1 Metallead-Ridge-Waveguide (-MCRW-) Laservorrichtung
- 2 Halbleiter-Substrat
- 3 erste Mantelschicht
- 4 aktive Zone
- 5 zweite Mantelschicht
- 6 Kontaktschicht
- 7 Steg
- 8 Graben
- 9 Passivierungsschicht
- 10 Oberseite
- 11 Metallisierungsschicht
- 12 Hilfsmaskenschicht
- 13 Grabenmaske
- 14 Grabenbereich
- 15 Stegmaske
- 16 Unterätzung
- 17 Photolackflanken

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Stegwellenleiters in III-V-Verbindungshalbleiter-Schichtstrukturen, mit

den Schritten:

- Fertigen einer auf einem Halbleiter-Substrat (2) insbesondere durch epitaktisches Aufwachsen ausgebildeten Grundstruktur mit einer ersten Mantelschicht (3), einer auf der ersten Mantelschicht (3) abgeschiedenen aktiven Zone (4) bestehend aus einheitlichem Material oder aus einer Wechselfolge von Quantentöpfen und Barrieren, einer auf der aktiven Zone (4) abgeschiedenen zweiten Mantelschicht (5) und einer auf der zweiten Mantelschicht (5) abgeschiedenen Kontaktschicht (6);
- ganzflächiges Abscheiden und Strukturieren einer Grabenmaske (12, 13) zur Festlegung eines Grabenbereiches (14), der eine vielfache Breite eines nachfolgend innerhalb des Grabenbereiches (14) aus der zweiten Mantelschicht (5) und der Kontaktschicht (6) zu erzeugenden Steges (7) besitzt;
- Einbringen zusätzlicher Dotieratome in die Kontaktschicht (6) und/oder Aktivieren der zusätzlich eingebrachten oder der bereits vorhandenen Dotieratome;
- Ausbilden einer im Wesentlichen streifenförmigen Stegmaske (15) innerhalb des Grabenbereiches (14);
- selektives Ätzen der Kontaktschicht (6) und der zweiten Mantelschicht (5) unter Verwendung der Grabenmaske und der Stegmaske (15) als Abdeckmasken zur Ausbildung des Steges (7) des Stegwellenleiters bei gleichzeitiger Ausbildung eines Grabens (8) innerhalb des Grabenbereiches (14);
- im Wesentlichen kantenkonformes Abscheiden einer Passivierungsschicht (9) aus elektrisch isolierendem Material;
- Abheben des auf der Stegmaske (15) abgeschiedenen Materials der Passivierungsschicht (9) durch Entfernen des unterliegenden Maskenmaterials der Stegmaske (15); und
- Abscheiden einer Metallisierungsschicht (11) für den elektrischen Anschluss des Steges (7).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die zusätzlichen Dotieratome durch Eindiffundieren oder Implantieren in die Kontaktschicht (6) eingebracht werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Dotieratome Zn-Atome sind und daß das Eindiffundieren durch Aufschleudern einer Zn-haltigen Al_2O_3 -Aufschlammung und anschließendes Tempern, beispielsweise für 10 Sekunden bei $650^\circ C$, durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein zusätzliches Tempern in H_2 -, N_2 -, Ar-Gas oder einer Mischung hiervon, beispielsweise für 10 Minuten bei $400^\circ C$, angefügt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Aktivieren der zusätzlich eingebrachten oder bereits vorhandenen Dotieratome mindestens teilweise durch einen UV-Strahlungspuls einer Laserquelle erfolgt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Ätzen der Kontaktschicht (6) und der zweiten Mantelschicht (5) zur Ausbildung des Steges (7) des Stegwellenleiters nass-chemisch erfolgt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Ätzen der Kontaktschicht (6) und der

zweiten Mantelschicht (5) in zwei voneinander getrennten Ätzschritten mit unterschiedlichen Ätzlösungen durchgeführt wird, wobei die Ätzung der jeweiligen Schicht selektiv gegenüber dem jeweils unterliegenden Material durchgeführt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß beim nass-chemischen Ätzen der Kontaktschicht (6) das von der Stegmaske (15) abgedeckte Material unterätzt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur nass-chemischen Ätzung der Kontaktschicht (6) eine Schwefelsäure-Wasserstoffperoxid-Wasser-Ätzlösung verwendet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß zur nass-chemischen Ätzung der zweiten Mantelschicht (5) eine Phosphorsäure-Salzsäure-Ätzlösung verwendet wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Ätzung der zweiten Mantelschicht (5) keine Unterätzung gegenüber der als Ätzmaske wirkenden, strukturierten Kontaktschicht (6) erfolgt.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 6 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß sämtliche nass-chemische Ätzvorgänge in vertikaler Richtung an der der zu ätzenden Schicht unmittelbar folgenden Grenzschicht aufgrund der materialspezifischen Selektivität der Ätzlösungen zu stehen kommen.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Flankenwinkel der Kontaktschicht (6) eindeutig durch die kristallographisch bedingten Eigenschaften des Kontaktschichtmaterials vorgegeben bzw. bestimmt werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Stegmaske (15) in einem selbstjustierenden Prozess die Stegposition innerhalb des Grabens festgelegt wird, bezüglich der Breite des Steges aber lediglich der maximale Wert vorbestimmt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Grabenmaske eine aus Halbleitermaterial bestehende Schicht aufweist und die Stegmaske (15) eine Photolackmaske darstellt.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Orientierung der Stegmaske (15) und/oder Grabenmaske parallel zu den kristallographischen Richtungen [0111 oder roh] ausgerichtet wird.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Passivierungsschicht (9) Al_2O_3 aufweist und vermittelt einem ionenstrahlgestützten Sputterprozess-Schritt (16) ganzflächig abgeschieden wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß auf die Grundstruktur für die Ausbildung der Grabenmaske ganzflächig eine Hilfsmaskenschicht (12) abgeschieden wird, die zur Festlegung des Grabenbereiches (14) selektiv geätzt wird.

19. Halbleiterlaservorrichtung mit einer auf einem Halbleiter-Substrat (2) insbesondere durch epitaktisches Aufwachsen ausgebildeten Grundstruktur mit einer ersten Mantelschicht (3), einer auf der ersten Mantelschicht (3) abgeschiedenen aktiven Zone (4) bestehend aus einheitlichem Material oder aus einer Wechselfolge von Quantentöpfen und Barrieren, einer auf der aktiven Zone (4) abgeschiedenen zweiten Mantelschicht (5), und einer auf der zweiten Mantelschicht (5)

abgeschiedenen Kontaktschicht (6), wobei die zweite Mantelschicht (5) und die Kontaktschicht (6) über dem laseraktiven Bereich zu einem im Wesentlichen streifenförmigen Steg (7) eines Stegwellenleiters gebildet sind, dadurch gekennzeichnet,

- daß in einen oberflächennahen Bereich der Kontaktschicht (6) Dotieratome eingebracht sind;
- daß der Steg (7) des Stegwellenleiters innerhalb eines in der zweiten Mantelschicht (5) und der Kontaktschicht (6) gefertigten Grabens (8) gebildet ist, wobei die Breite des Grabens (8) ein Vielfaches der Breite des Steges (7) besitzt.

20. Halbleiterlaservorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Dotieratome durch Eindiffundieren eingebracht sind.

21. Halbleiterlaservorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Dotieratome Zn-Atome sind und daß das Eindiffundieren durch Aufschleudern einer Zn-haltigen Al_2O_3 -Aufschlämmung und anschließendem Diffusionstempern, beispielsweise für 5 Sekunden bei 560°C , durchgeführt worden ist.

22. Halbleiterlaservorrichtung nach einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die außerhalb des Grabenbereiches (14) liegenden Bestandteile der Kontaktschicht (6), die Seitenwände und Böden des Grabens (8), sowie die Seitenwände des aus der zweiten Mantelschicht (5) und der Kontaktschicht (6) gebildeten Steges (7) im Wesentlichen kantenkonform durch eine Passivierungsschicht (9) aus elektrisch isolierendem Material überdeckt sind, und eine auf der Passivierungsschicht (9) und der von der Passivierungsschicht (9) nicht abgedeckten Oberseite (10) des Steges (7) abgeschiedene Metallisierungsschicht (11) für den elektrischen Anschluss des Steges (7) vorgesehen ist.

23. Halbleiterlaservorrichtung nach einem der Ansprüche 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Passivierungsschicht (9) Al_2O_3 aufweist.

24. Halbleiterlaservorrichtung nach einem der Ansprüche 19 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Mantelschicht (5) InP aufweist, und die Kontaktschicht (6) InGaAs aufweist.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

Fig1

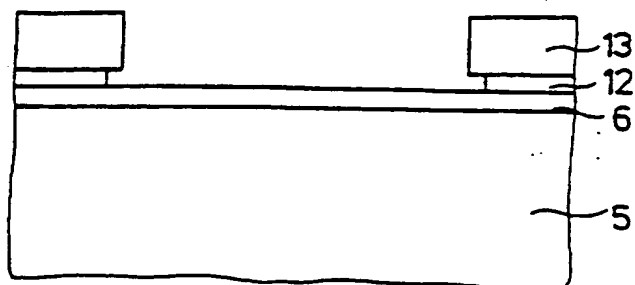


Fig2

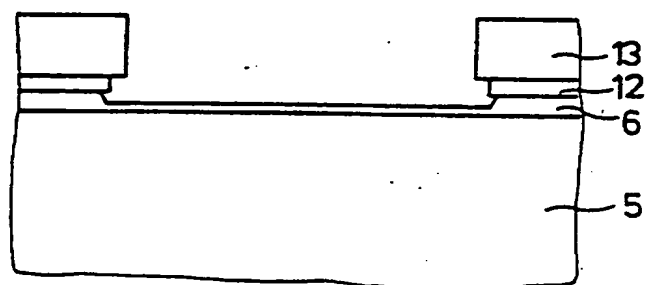


Fig3

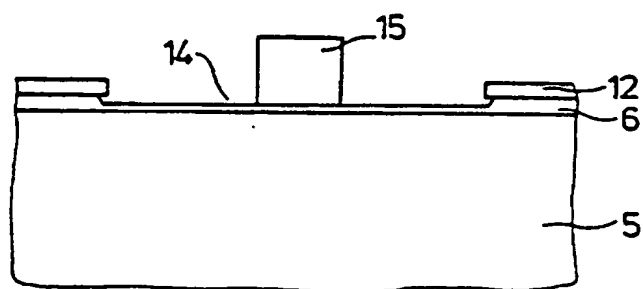


Fig4

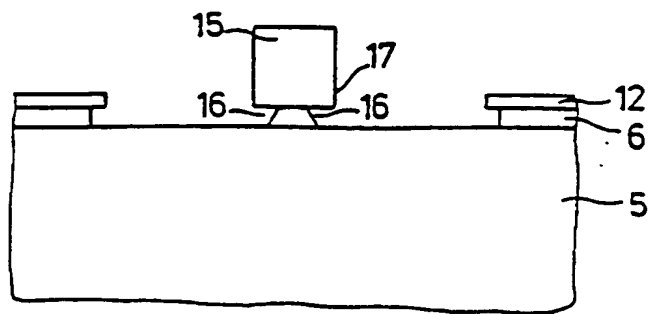


Fig5

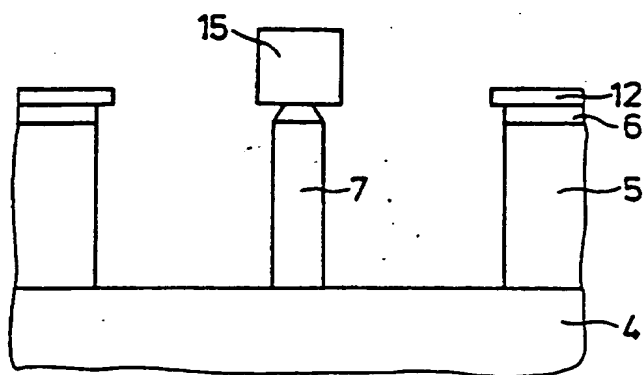


Fig6

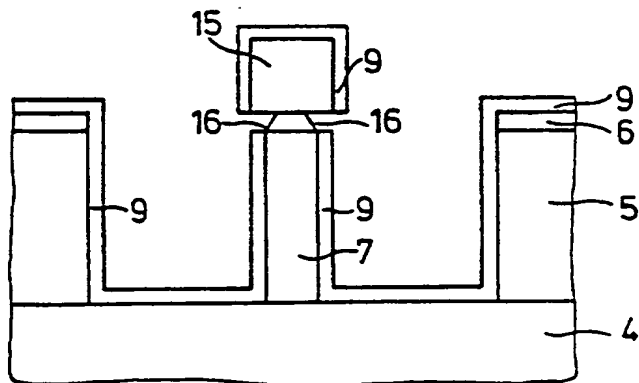


Fig7

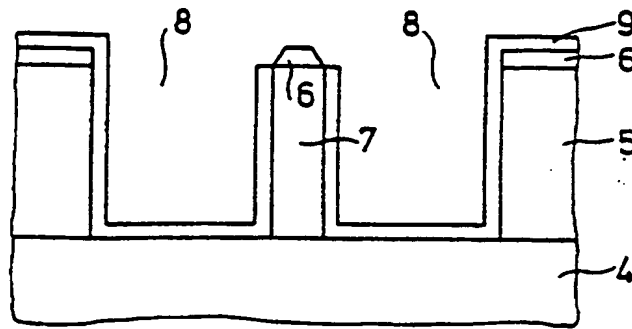


Fig8

